

TEORI RELATIVITAS PADA *GLOBAL POSITIONING SYSTEM* (GPS)

Richardo Barry Astro¹ dan Siti Humairo²

¹Program Studi Pendidikan Fisika, FKIP, Universitas Flores

²Program Studi Pengajaran Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung

Email: richardobarryastro@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini yang bertujuan untuk mengetahui prinsip kerja *Global Positioning System* (GPS) sebagai teknologi yang menerapkan konsep relativitas, serta pengaruh yang terjadi akibat relativitas dalam GPS sebagai upaya mengedepankan pembelajaran kontekstual. Jenis penelitian ini adalah studi literatur. Secara umum sistem GPS memiliki tiga komponen utama yakni *ground segmen* (stasiun kontrol), *space segmen* (satelit), dan *user segmen* (perangkat *receiver*). GPS menentukan posisi *receiver* dengan metode trilaterasi dari sedikitnya empat satelit yang selalu terlihat dari titik manapun di bumi setiap saat. Informasi dari tiga satelit diperlukan untuk menentukan lokasi, sedangkan sinyal ke-empat dibutuhkan untuk menentukan waktu secara akurat. Relativitas menyebabkan sistem GPS mengalami penyimpangan waktu. Gerak relatif satelit terhadap bumi mengakibatkan waktu di satelit lebih lambat dibanding waktu bumi (Teori Relativitas Khusus), sedangkan gravitasi bumi membuat waktu satelit bergerak lebih cepat dibanding waktu bumi (Teori Relativitas Umum). Oleh karena itu, sistem GPS perlu melakukan koreksi-koreksi yang berkaitan dengan efek relativistik dalam upaya mencapai tingkat akurasi yang tinggi. Upaya membuat sistem GPS presisi adalah mengatur frekuensi detak jam atom yang diperlambat sebelum satelit diluncurkan, sehingga jam atom ini akan berdetak selaras dengan jam di bumi setelah berada di orbit.

Kata Kunci: *Global positioning system*, relativitas khusus, dan relativitas umum.

PENDAHULUAN

Global Positioning System (GPS) merupakan sebuah perangkat yang menyediakan layanan posisi, navigasi, dan waktu bagi pengguna. GPS dikembangkan sejak tahun 1973 untuk mengatasi keterbatasan banyak sistem navigasi yang ada dan berada dibawah kendali Departemen Pertahanan Amerika Serikat (Federal Aviation Administration, 2014; Oxley, 2017). Teknologi GPS semula bertujuan untuk memberikan bantuan navigasi bagi militer, namun kemudian merambah ke berbagai bidang kehidupan, contohnya navigasi transportasi darat, laut, dan udara. GPS juga dimanfaatkan untuk pemetaan geografis seperti pembuatan peta digital dan pengukuran suatu wilayah, serta berperan besar dalam menentukan lokasi. Satelit-satelit GPS mengorbit bumi dengan konfigurasi tertentu. Kecepatan orbit satelit serta faktor gravitasi bumi menyebabkan sistem GPS mengalami relativitas. Oleh karena itu sistem GPS perlu membuat koreksi-koreksi yang berkaitan dengan relativitas guna penunjukkan

posisi, navigasi, dan waktu yang presisi bagi pengguna. Teknologi GPS adalah contoh penerapan teori relativitas.

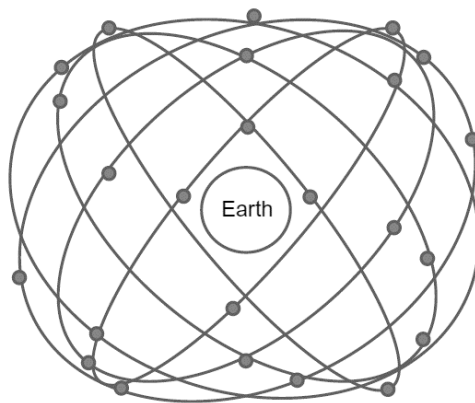
Teori relativitas menjadi salah satu tulang punggung fisika modern, terutama dalam penataan dan pelurusan konsep-konsep dasar dalam fisika yang berkaitan dengan ruang-waktu, momentum-energi sebagai aspek kinematika semua gejala alam, yang selanjutnya mengangkat cahaya sebagai pembawa isyarat berkelajuan maksimum (Anugraha, 2011). Teori relativitas Einstein meliputi Teori Relativitas Khusus (TRK) dan Teori Relativitas Umum (TRU). TRK merupakan teori tentang bagaimana gerakan dengan laju mendekati laju cahaya dapat mempengaruhi pengukuran panjang dan waktu. Sedangkan TRU menangani kerangka sistem dengan percepatan dan sistem gravitasi yang tidak dapat diselesaikan oleh TRK. Pembuatan sistem GPS perlu memperhitungkan penyimpangan waktu sesuai teori relativitas.

Konsep relativitas terkesan abstrak dan sulit dibayangkan oleh sebagian besar siswa dan mahasiswa yang mempelajari fisika. Hal ini berangkat dari fakta bahwa ruang lingkup relativitas yang mensyaratkan keadaan mendekati kecepatan cahaya serta konsep gravitasi dan kaitannya dengan ruang-waktu lengkung. Pada makalah ini akan diuraikan prinsip kerja GPS sebagai teknologi yang menerapkan konsep relativitas, serta pengaruh relativitas dalam GPS sebagai upaya mengedepankan pembelajaran kontekstual.

PEMBAHASAN

Global Positioning System

Sistem navigasi GPS terdiri dari tiga komponen utama yakni *ground segmen* yang merupakan stasiun di bumi sebagai pengendali satelit, *space segmen* berupa satelit-satelit yang mengorbit bumi, dan *user segmen* berupa perangkat penerima GPS (Oxley, 2017; Hartini, 2019). Hingga tahun 2012 terdapat 32 satelit GPS yang mengorbit bumi pada ketinggian sekitar 20.200 km. Satelit-satelit GPS mengorbit dengan periode 11 jam 58 menit (Pope dkk., 2010; Federal Aviation Administration, 2014; Oxley, 2017). Dengan periode orbit dua kali sehari dan radius sekitar 26.600 km maka masing-masing satelit memiliki kecepatan orbit sekitar 3874 m/s. Satelit GPS juga dilengkapi roket pendorong untuk menjaga satelit tetap pada orbitnya, serta memiliki baterai sebagai sumber tenaga ketika tidak mendapat cahaya matahari maupun saat terjadi gerhana matahari (Hartini, 2019).



Gambar 1. Konfigurasi orbit satelit GPS (Oxley, 2017)

Ground segment atau *control segment* dapat dibagi menjadi empat bagian antara lain stasiun kontrol pusat, stasiun kontrol alternatif, antena, dan stasiun monitor. Segmen ini bertanggung jawab memantau jalur orbit satelit guna sinkronisasi jam atom, melakukan koreksi-koreksi kesalahan model orbit satelit, pembaharuan navigasi, informasi cuaca luar angkasa, dan sebagainya (Oxley, 2017).

Secara umum perangkat GPS mengukur waktu tempuh gelombang elektromagnetik sampai pada *receiver* dari sedikitnya empat satelit berbeda sehingga diperoleh jarak antara receiver terhadap satelit-satelit tersebut. Perbandingan jarak beberapa satelit tersebut selanjutnya diterjemahkan ke dalam sistem koordinat bumi maupun peta digital (Weiss dan Ashby, 1997; Oxley, 2017). Sistem GPS dapat mengetahui jarak satelit terhadap *receiver* melalui persamaan berikut:

$$d = v \cdot \Delta t \quad (1)$$

dengan Δt merupakan selisih waktu saat sinyal diterima oleh *receiver* terhadap waktu saat sinyal ditransmisikan oleh satelit, dan v adalah cepat rambat gelombang elektromagnetik.

Teori Relativitas Khusus

TRK dikembangkan oleh Einstein mengacu pada kerangka referensi yang bergerak dengan kecepatan konstan dan didasarkan pada dua postulat yaitu “(1) *Asas relativitas*: hukum-hukum fisika tetap sama pernyataannya dalam semua sistem lembam, (2) *Ketidakubahan laju cahaya*: laju cahaya memiliki nilai c ($2,99792458 \times 10^8$ m/s) yang sama dalam semua sistem lembam” (Krane, 2014; Pope dkk., 2010).

Konsekuensi akibat TRK antara lain kecepatan relatif, kontraksi panjang, dilatasi waktu, massa relativistik, energi kinetik relativistik, energi relativistik total, momentum relativistik, efek doppler relativistik. Salah satu konsekuensi signifikan dari postulat tersebut adalah jam yang bergerak lambat. Secara lebih spesifik relativitas khusus menyatakan bahwa seorang pengamat dalam suatu kerangka inersia melihat jam yang bergerak relatif terhadap dirinya seolah bergerak lambat. Fenomena ini disebut sebagai dilatasi waktu dan dinyatakan oleh persamaan berikut (Krane, 2014; Pope dkk., 2010):

$$\Delta t' = \gamma \Delta t = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3)$$

Dengan $\Delta t'$ adalah selang waktu untuk pengamat, Δt adalah selang waktu pada jam yang bergerak, dan v adalah kecepatan satelit relatif terhadap pengamat, serta c adalah kecepatan cahaya.

Berdasarkan persamaan (2), pengamat di bumi akan melihat jam pada satelit bergerak lebih lambat dengan nilai yang bergantung pada kecepatan relatif satelit. Jika satelit bergerak dengan kecepatan 3874 m/s maka untuk setiap detik waktu yang diamati dari satelit GPS, waktu di bumi telah bergerak selama 1,000000000083 sekon. Dengan kata lain untuk tiap detik waktu di bumi, pengamat akan melihat jam satelit GPS mengalami keterlambatan sebesar $8,3 \times 10^{-11}$ sekon. Keterlambatan tersebut jika diakumulasikan dalam satu hari maka diperoleh total selisih waktu antara jam satelit dan jam di bumi sebesar $7,2 \mu s$, atau jam satelit tertinggal $7,2 \mu s$ menurut pengamat di bumi perhari. Jika ketidaksinkronan waktu ini dibiarkan

maka akan terjadi kesalahan dalam pengukuran jarak GPS. Dari persamaan (1) dengan dilatasi waktu $7,2 \mu s$ maka diperoleh penyimpangan jarak sejauh 2,1 km perhari. Penyimpangan ini sangat berbahaya jika digunakan dalam sistem navigasi transportasi seperti pesawat, kapal laut, dan sebagainya.

Teori Relativitas Umum

Teori Relativitas Umum (TRU) dikembangkan Einstein untuk menangani kerangka sistem dengan percepatan dan sistem gravitasi yang tidak dapat diselesaikan oleh TRK (TRK terbatas pada gerak relatif dengan kecepatan konstan). TRU mendefinisikan gravitasi sebagai efek dari kelengkungan ruang-waktu karena adanya penyebaran massa dan energi di dalam ruang-waktu tersebut (Anugraha, 2011). Perbedaan utama TRK dan TRU adalah bahwa relativitas khusus berurusan dengan ruang-waktu “datar”, sedangkan relativitas umum dengan ruang-waktu “lengkung” (Krane, 2014). Beberapa implikasi akibat konsep ruang-waktu yang dapat melengkung akibat benda bermassa antara lain: pembelokan cahaya yang melewati materi masif seperti matahari, gagasan gelombang gravitasi (*gravitational waves*), gagasan lubang hitam (*black hole*) dan lubang putih (*white hole*) serta lubang ulat (*worm hole*), hingga gagasan mesin waktu dan penjelajah waktu.

Salah satu implikasi dari kelengkungan ruang-waktu pada TRU adalah gravitasi menyebabkan terjadi pemuluran waktu (Pope dkk., 2010). Cahaya membutuhkan waktu lebih lama untuk melakukan perjalanan antara dua titik terpendek dalam geometri lengkung (geodesic) sehingga terjadi pemuluran waktu yang dikenal sebagai *Gravitational Time Dilation*. Waktu di daerah dengan medan gravitasi yang besar akan menjadi lebih lambat bergerak dibandingkan dengan waktu di daerah dengan medan gravitasi yang lebih kecil (Kennell, 2015). Rasio waktu dalam medan gravitasi memenuhi persamaan (Pope dkk., 2010):

$$\frac{\Delta t_s}{\Delta t_R} = 1 + \frac{\Delta \Phi}{c^2} \quad (4)$$

dengan Δt_R adalah selang waktu untuk *receiver*, Δt_s selang waktu pada sumber, $\Delta \Phi$ beda potensial gravitasi antara sumber dan *receiver*, dan c kecepatan cahaya. Untuk sistem GPS, rasio waktu satelit t_{sat} dan waktu penerima bumi t_E memenuhi persamaan (Pope dkk., 2010):

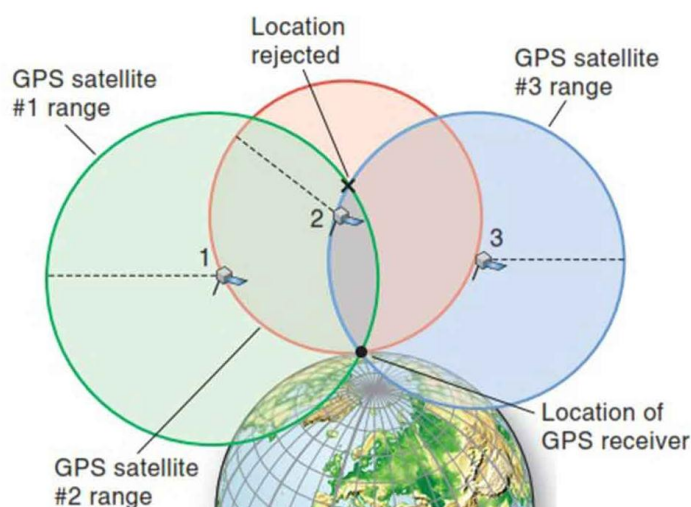
$$\frac{\Delta t_{Sat}}{\Delta t_E} = 1 + \frac{\left(\frac{GM}{r_E} - \frac{GM}{r_{Sat}} \right)}{c^2} \quad (5)$$

dengan r_E merupakan jari-jari bumi ($6,4 \times 10^6 m$), r_{sat} adalah jari-jari orbit satelit terhadap inti bumi ($2,64 \times 10^7 m$), G adalah tetapan gravitasi ($6,67 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2$), serta M adalah massa bumi ($5,97 \times 10^{24} kg$).

Berdasarkan persamaan (5) maka diperoleh Δt_{sat} sebesar $(1 + 5,2 \times 10^{-10})\Delta t_E$. Terlihat bahwa terjadi perbedaan waktu antara jam di bumi dan jam di satelit. Setiap detik waktu di bumi maka waktu satelit tercatat menempuh $1,00000000052 s$. Hal ini menunjukkan bahwa waktu satelit bergerak lebih cepat $5,2 \times 10^{-10} s$ dari waktu bumi untuk setiap detiknya. Dengan demikian dalam satu hari waktu satelit bergerak lebih cepat $45 \mu s$ dibandingkan dengan waktu di bumi. Hal ini turut mengakibatkan kesalahan dalam pengukuran jarak GPS menggunakan persamaan (1) dengan akumulasi *error* yang cukup besar ($13,5 km$). Oleh karena itu pada pembuatan GPS sangat perlu untuk mempertimbangkan dampak dari relativitas umum.

Prinsip Kerja Global Positioning System (GPS)

GPS menentukan posisi *receiver* dengan metode trilaterasi dari sedikitnya empat satelit yang dapat selalu terlihat di titik manapun di bumi pada tiap waktu. Trilaterasi merupakan metode penentuan koordinat spasial sebuah titik yang tidak diketahui berdasarkan informasi jarak antara titik tersebut dengan minimal tiga buah koordinat (Navidi dkk., 1998). Tiap satelit GPS mentransmisikan sinyal yang mengandung informasi mengenai posisi satelit tersebut, waktu, dan kondisi sistem secara umum. Selanjutnya *receiver* menggunakan sinyal tersebut untuk menghitung jarak satelit transmisi dengan cara mengalikan waktu yang di tempuh sinyal dan kecepatan sinyal (kecepatan cahaya). *Receiver* dapat menentukan lokasinya sebagai titik yang diperoleh dari perpotongan keempat lingkup imajiner (Gambar 2). Tiga ruang lingkup tersebut diperlukan untuk menentukan lokasi, dan sinyal ke-empat dibutuhkan untuk menentukan waktu yang tepat digunakan dalam perhitungan. Dengan cara tersebut *receiver* dapat menentukan posisinya dengan cukup akurat dan cepat (Pope dkk., 2010).



Gambar 2. Penentuan posisi sistem GPS dengan metode Trilaterasi (Sharda, 2018)

Untuk mencapai tingkat akurasi yang tinggi GPS harus menggunakan informasi yang sangat tepat termasuk penanda waktu yang sangat presisi. Oleh karena itu setiap satelit GPS membawa jam atomik yang menggunakan cesium-133 dengan satu elektron valensi yang bisa berpindah sehingga dapat mengalami transisi dengan energi dan frekuensi yang sangat spesifik. Transisi ini digunakan untuk menghasilkan resonansi getaran pada 9192631770 Hz yang sangat sensitif terhadap variasi frekuensi dan dengan demikian menghasilkan pengukuran waktu yang sangat akurat (Pope dkk., 2010).

Pada sistem GPS terjadi penyimpangan waktu yang diakibatkan oleh gerak relatif satelit terhadap bumi (TRK) maupun akibat gravitasi bumi (TRU). Gerak relatif satelit mengakibatkan waktu di satelit tertinggal $7,2 \mu s$ dibanding waktu di bumi, sedangkan gravitasi bumi membuat waktu satelit bergerak $45 \mu s$ lebih cepat dibanding waktu di bumi. Dengan akumulasi selisih waktu akibat kedua faktor tersebut sebesar $37,8 \mu s$, maka terjadi penyimpangan pengukuran posisi (navigasi) sistem GPS sekitar 11,33 km per hari. Oleh karena itu, sistem GPS perlu melakukan koreksi-koreksi yang berkaitan dengan efek

relativistik dalam upaya mencapai tingkat akurasi yang tinggi. Upaya membuat sistem GPS menjadi presisi adalah mengatur frekuensi detak jam atom yang diperlambat sebelum satelit diluncurkan, sehingga setelah berada di orbit jam atom ini akan berdetak selaras dengan jam di bumi. Upaya lain termasuk sinkronisasi jam atom satelit GPS dan upaya koreksi lainnya yang dapat dikerjakan dari stasiun kontrol.

KESIMPULAN

Sistem GPS memiliki satelit-satelit yang mengorbit bumi pada ketinggian dan kecepatan orbit tertentu. Masing-masing satelit membawa jam atomik dan berperan besar dalam menentukan lokasi/posisi pengguna GPS. Berdasarkan teori relativitas maka satelit-satelit yang bergerak relatif terhadap bumi serta faktor gravitasi bumi mengakibatkan terjadi penyimpangan waktu satelit terhadap waktu bumi. Penyimpangan waktu tersebut akan berimbas pada akurasi sistem GPS dan berbahaya terutama bagi navigasi transportasi.

Satelit GPS yang bergerak relatif mengakibatkan terjadinya keterlambatan waktu satelit oleh pengamat di bumi (TRK). Demikian halnya posisi satelit yang berada di medan gravitasi lemah mengakibatkan waktu satelit menjadi lebih cepat dibanding waktu di permukaan bumi dengan medan gravitasi yang lebih besar (TRU). Penyimpangan waktu ini dapat menyebabkan penyimpangan jarak/posisi *receiver* dalam sistem. Upaya untuk mengatasi efek relativitas pada sistem GPS dilakukan dengan cara memperlambat jam atom pada satelit sebelum diluncurkan ke orbit. Hal ini bertujuan untuk menyamakan detak jam atom satelit dengan waktu di bumi ketika mengorbit sehingga tidak ada perbedaan waktu antara bumi dan satelit.

REFERENSI

- Anugraha, R. 2011. *Teori Relativitas dan Kosmologi*, Yogyakarta: UGM Press.
- Federal Aviation Administration. 2014. Satellite Navigation - Global Positioning System (GPS), artikel dari *United States Department of Transportation*. Diperoleh melalui situs internet https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/gps/. Diakses tanggal 30 Agustus 2019.
- Hartini, S. 2019. Revolusi Ilmiah: Global Positioning System (GPS) Sebagai Bukti Empiris Teori Relativitas, *Jurnal Filsafat Indonesia*, 2 (1). ISSN: E-ISSN 2620-7982, P-ISSN: 2620-7990. (27-32)
- Krane, K. 2014. *Fisika Modern*, Jakarta: Universitas Indonesia.
- Kennell, J. 2015. How Gravity Changes Time: The Effect Known as Gravitational Time Dilation, artikel dari *The Science Explorer*. Diperoleh melalui situs internet <http://thescienceexplorer.com/universe/how-gravity-changes-time-effect-known-gravitational-time-dilation>. Diakses tanggal 8 September 2019.
- Navidi, W., Murphy, W.S.Jr., & Hereman, W. 1998. Statistical Methods in Surveying by Trilateration. *Computational Statistics & Data Analysis* Vol 27 (2). (209-227).
- Oxley, A. 2017. *Uncertainties in GPS Positioning 1st Edition: A Mathematical Discourse*. London: Academic Press.
- Pope, D., Fish, D., Tevlin, R., & Langford T. 2010. *GPS Relativity Guide*, Ontario-Canada: Perimeter Institute for Theoretical Physics.
- Sharda, A. 2018. How GPS Works, artikel dari *Medium Corporation*. Diperoleh melalui situs internet <https://medium.com/@aryamansharda/how-gps-actually-works-e6e0d126d2d5>. Diakses tanggal 8 September 2019.

Weiss, M & Ashby, N. 1997. *GPS Receivers and Relativity*. Proceeding of 29TH Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting. The U.S. Naval Observatory Washington DC. (69 - 83).